

ANALISIS TERHADAP MODEL LEPASAN RADIOAKTIF DAN TINDAKAN PROTEKTIF UNTUK KECELAKAAN POTENSIAL PLTN

Pande Made Udiyani dan Sugiyanto

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir - BATAN
Gd.80 Kawasan Puspiptek - Serpong,
email: pmade-u@batan.go.

ABSTRAK

ANALISIS TERHADAP MODEL LEPASAN RADIOAKTIF DAN TINDAKAN PROTEKTIF UNTUK KECELAKAAN POTENSIAL PLTN. Dispersi lepasan produk fisi dari PLTN pada kondisi kecelakaan merupakan topik penting terkait dengan kecelakaan nuklir di Fukushima, karena konsekuensi radiologinya terhadap manusia dan lingkungan. Tujuan penelitian adalah mengkaji dan menganalisis model lepasan radioaktif dan tindakan protektif untuk kecelakaan potensial PLTN jika terjadi di Indonesia. Analisis dan pemodelan dilakukan pada PLTN dari PWR -1000 yang diaplikasikan untuk contoh tapak Semenanjung Muria dan Pesisir Banten. Postulasi kecelakaan adalah yang mengakibatkan teras meleleh dan kegagalan kontainmen reaktor untuk memitigasi lepasan radioaktif ke lingkungan. Dari penelitian ini diperoleh model lepasan radioaktif dan model tindakan protektif untuk dua contoh tapak di Indonesia yaitu tapak Semenanjung Muria dan Pesisir Banten, dengan postulasi kecelakaan yang sama. Analisis terhadap penggunaan model yang sama menghasilkan lepasan dan tindakan protektif yang tidak sama untuk kedua tapak tersebut; karena dipengaruhi oleh kondisi meteorologi tapak yang meliputi kecepatan angin, arah angin, dan stabilitas cuaca; dan kondisi lingkungan tapak berupa kerapatan dan distribusi penduduk, produksi pertanian dan peternakan penduduk lokal, dan konsumsi hasil pertanian dan peternakan setempat.

Kata kunci: lepasan radioaktif, tindakan proteksi, kecelakaan, PLTN

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE RADIOACTIVE RELEASE AND PROTECTIVE ACTIONS MODEL FOR NPP POTENTIAL ACCIDENT. Dispersion release of fission products from nuclear plants in accident conditions is an important topic related to the nuclear accident in Fukushima, due to the consequences to humans and the environment. The research objectives are to examine and analyze radioactive release and model of protective actions for nuclear power plants in case of potential accidents in Indonesia. Analysis and modeling of PWR nuclear power plants performed at 1000 MWe was applied to site samples of Muria Peninsula and Banten Coastal. Accidents postulations are that resulted in core melt and containment failure of the reactor which to mitigate radioactive release to environment. Of this study were obtained and analysis of radioactive release and protective action measures models for the two examples site. Analysis of the same model results different radioactive release and protective action for both sites; as influenced by meteorological conditions of the site, which includes wind speed, wind direction and weather stability, and environmental conditions of the site, inform of the density and distribution of population, agricultural production and local farms, and consumption of local agricultural produce and livestock.

Keywords: radioactive release, protective action, accident, NPP

PENDAHULUAN

Dispersi lepasn radionuklida hasil belah dari Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) pada kondisi kecelakaan merupakan topik penelitian penting terkait dengan kecelakaan nuklir di Fukushima, karena konsekuensi radiologinya terhadap manusia dan lingkungan. PLTN merupakan instalasi nuklir yang memerlukan adanya sistem pengendalian keselamatan dari pengoperasian reaktor, untuk memitigasi adanya lepasn radioaktif yang terdispersi ke lingkungan. Pengkajian dan verifikasi keselamatan merupakan suatu kebutuhan dan keharusan untuk setiap reaktor, baik itu reaktor riset maupun reaktor daya. Tujuan analisis keselamatan adalah untuk konfirmasi desain yang berbasis keselamatan dan menghasilkan lepasn yang sesuai dengan aturan keselamatan radiasi yang telah ditentukan. Tujuan lainnya dari analisis keselamatan adalah untuk membuktikan bahwa persyaratan keselamatan yang direncanakan dapat mencegah kecelakaan yang dipostulasikan atau dapat memitigasi dampaknya pada masyarakat dan lingkungan.

Dampak yang ditimbulkan dari pengoperasian suatu PLTN bisa bersumber dari pengoperasian normal reaktor maupun dari kejadian akibat kecelakaan. Dampak radiasi dari pengoperasian normal suatu reaktor bisa dipantau dan dimonitor, yang dilakukan di dalam reaktor dan lingkungan tapak reaktor. Sedangkan dampak radiasi yang terjadi karena terjadinya suatu kecelakaan dilakukan dengan melakukan pengkajian terhadap sebab dan akibat yang terjadi jika terjadi kecelakaan, dan melakukan manajemen kecelakaan. Pengkajian dilakukan dengan melakukan perhitungan dampak yang timbul berdasarkan postulasi kecelakaan yang diskenariokan.

Lepasn bahan-bahan radioaktif ke atmosfer dapat mengakibatkan paparan ke manusia melalui sejumlah alur (*pathway*) [1]. Radionuklida di udara dapat meningkatkan paparan melalui 2 alur utama: (1) irradiasi eksternal oleh foton dan elektron yang dikeluarkan sebagai hasil proses peluruhan radioaktif, dan (2) irradiasi internal menyusul terhirupnya radionuklida tersebut. Radionuklida yang terdispersi dalam kepulan asap di udara (*plume*) akan melalui proses deposisi ke permukaan tanah dan peluruhan radioaktif. Radionuklida dapat kembali terhirup oleh manusia karena terjadinya gangguan yang disebabkan oleh angin dan manusia. Di samping itu, deposisi radionuklida ke dalam tumbuhan dan tanah akan menyebabkan perpindahan radionuklida ke bahan pangan manusia.

Tindakan protektif atau *emergency response* dilakukan jika sudah terjadi dispersi lepasn radionuklida dari PLTN, yang bertujuan untuk mitigasi konsekuensi radiologis terhadap lingkungan dan masyarakat. Tindakan protektif yang dapat dilakukan adalah tindakan segera (*early counter measure*) seperti : pemberian tablet jodium, dekontaminasi personil, *sheltering* (berlindung di ruangan dengan ventilasi minimum), dan evakuasi. Sedangkan tindakan tunda (*late counter measure*) dilakukan dengan melakukan dekontaminasi area, pembatasan makanan (*food banning*) dan relokasi.

Tujuan penelitian adalah mengkaji dan menganalisis dispersi serta pemodelan tindakan protektif untuk kecelakaan potensial PLTN jika terjadi di Indonesia. Analisis dan pemodelan dilakukan pada PLTN dari PWR -1000 yang diaplikasikan untuk contoh tapak Semenanjung Muria dan Pesisir Banten. Metode penelitian dengan melakukan simulasi perhitungan lepasn dispersi radionuklida dengan postulasi kecelakaan yang mengakibatkan teras meleleh yaitu kecelakaan *Large Break LOCA*.

TEORI

Perhitungan kebocoran dari teras reaktor menggunakan persamaan (1). Diasumsikan tingkat laju kebocoran $X\%$ per hari dari kebocoran $L(t)$ adalah [2]:

$$B(t) = \frac{X}{2400} \text{ atom per jam} \quad (1)$$

Laju peluruhan hasil fisi di dalam sungkup reaktor:

$$\frac{dB(t)}{dt} = -\left(\lambda + \frac{X}{2400}\right) B(t) \quad (2)$$

Laju kebocoran pada waktu t adalah:

$$L(t) = \frac{X}{2400} B_0 \exp \left[- \left(\lambda + \frac{X}{2400} \right) t \right] \quad (3)$$

Jumlah total material yang bocor selama waktu t adalah:

$$\int_0^{L(t)} dL = - \int_{t_0=0}^t \frac{X}{2400} B_0 \exp \left[- \left(\lambda + \frac{X}{2400} \right) t \right] dt \quad (4)$$

$$L(t) = \frac{B_0 X}{2400} \cdot \frac{1}{\left(\lambda + \frac{X}{2400} \right)} \cdot \left[1 - \exp \left[- \left(\lambda + \frac{X}{2400} \right) t \right] \right] \quad (5)$$

Fraksi produk hasil fisi yang bocor selama waktu t adalah:

$$\frac{L(t)}{B_0} = \frac{X}{2400} \cdot \frac{1}{\left(\lambda + \frac{X}{2400} \right)} \cdot \left[1 - \exp \left[- \left(\lambda + \frac{X}{2400} \right) t \right] \right] \quad (6)$$

dengan:

- B_0 : jumlah bahan radioaktif awal yang terdispersi dalam volume (atom)
- $B(t)$: jumlah bahan radioaktif yang terdispersi dalam volume dalam waktu t (detik)
- X : laju kebocoran (% per hari) dari volume (%/hari)
- λ : konstanta peluruhan dari bahan radioaktif (jam^{-1})
- $L(t)$: jumlah bahan radioaktif yang terlepas (atom)
- t : waktu (jam)

Perhitungan dispersi radionuklida di atmosfer

Digunakan Persamaan Pasquill yang dimodifikasi Gifford [3]:

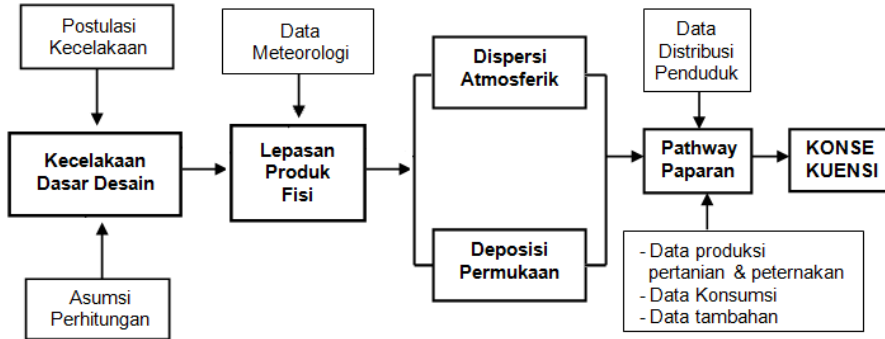
$$\chi = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\mu} \left[-1/2(y/\sigma_y)^2 \right] \left\{ \exp[-1/2((z-H)/\sigma_z)^2] + \exp[-1/2((z+H)/\sigma_z)^2] \right\} \quad (7)$$

dengan: χ (chi) adalah konsentrasi di udara (Bqdt/m^3), pada sumbu x searah angin, y tegak lurus arah angin, z ketinggian di atas permukaan tanah; Q merupakan lepasan radioaktif rata-rata yang ke luar dari cerobong (Bq); μ kecepatan angin rata-rata (m/dt); σ_y : koefisien dispersi horizontal (m); σ_z : koefisien dispersi vertikal (m) ; H tinggi cerobong efektif (m); y : jarak tegak lurus arah angin (m), z : ketinggian dari atas tanah (m)

TATA KERJA

Metodologi penelitian: adalah membuat model untuk dispersi atmosferik (Gambar 1), model *pathway* penerimaan dosis konsekuensi (Gambar 2), dan model tindakan protektif yang dilakukan untuk mitigasi konsekuensi (Gambar 3). Perhitungan *source term* di inventori dan aktivitas yang lepas ke lingkungan berdasarkan postulasi kecelakaan potensial dasar desain [4,5]. Perhitungan konsekuensi dan tindakan protektif menggunakan input data primer yaitu untuk kondisi meteorologi dan lingkungan untuk contoh tapak Semenanjung Muria dan Pesisir Banten [6-9]. Model dispersi atmosferik yang digunakan terdapat pada Gambar 1, model *pathway* pada Gambar 2, dan model tindakan protektif pada Gambar 3.

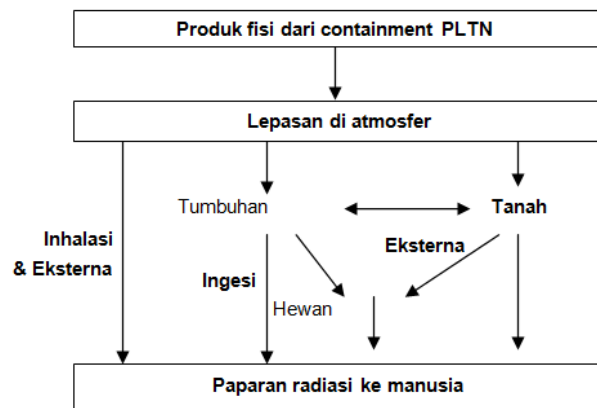
Model Dispersi Atmosferik



Gambar 1. Model dispersi atmosferik untuk lepasn produk fisi

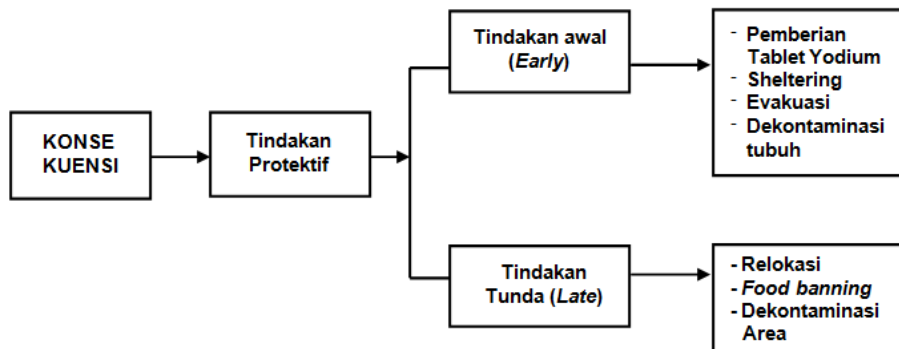
Model Pathway

Model alur paparan radiasi dan konsekuensi kecelakaan PLTN mengikuti model *pathway* [10] yang sudah dimodifikasi pada Gambar 2.



Gambar 2. Model alur paparan (*pathway*) dari lepasn di atmosfer ke manusia

Model tindakan protektif

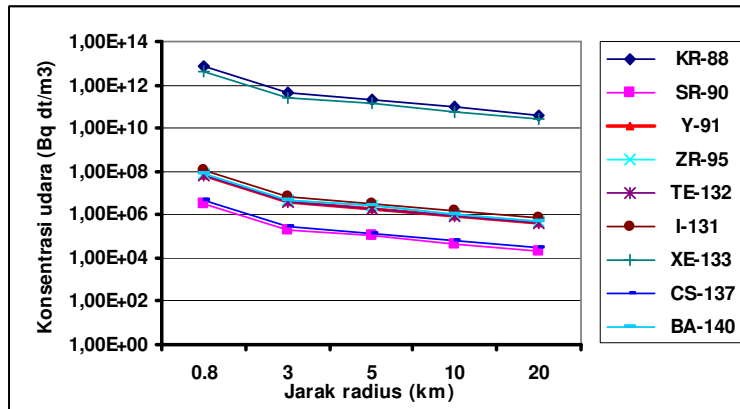


Gambar 3. Model tindakan protektif untuk mitigasi konsekuensi

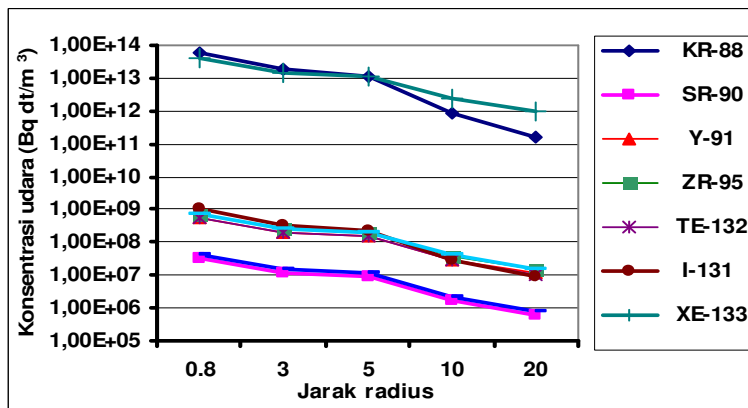
Dispersi atmosferik

Hasil simulasi untuk dispersi atmosferik dengan mengikuti model yang disusun dan digunakan dalam tulisan ini menggunakan model dari Gambar 1. Dengan menggunakan masukan kondisi meteorologi untuk contoh tapak Semenanjung Muria dan Pesisir Banten, diperoleh hasil yang ditampilkan pada Gambar 6 sampai Gambar 7 untuk contoh tapak Semenanjung Muria dan Pesisir Banten. Hasil simulasi dispersi atmosferik untuk konsentrasi di udara ditampilkan untuk produk hasil belah gas mulia (Xe dan Kr), Cs-137, I-131, Sr-90, dan Te-132. Sedangkan untuk aktivitas deposisi di permukaan antara lain untuk nuklida Cs-137, I-131, Sr-90, dan Te-132.

Hasil perhitungan dan simulasi untuk konsentrasi udara diberikan pada Gambar 6 (tapak Semenanjung Muria) dan Gambar 7 (tapak Pesisir Banten). Untuk dua tapak, konsentrasi hasil belah yang terdispersi di atmosfer maksimum ditunjukkan oleh gas mulia (Kr-88 dan Xe-133). Pada umumnya konsentrasi nuklida yang terdispersi di tapak Pesisir Banten lebih tinggi dari tapak Semenanjung Muria. Berdasarkan persamaan dispersi, dengan *source term*, ketinggian dan jarak yang sama, maka konsentrasi udara dipengaruhi oleh kondisi meteorologi tapak lokal. Besarnya konsentrasi udara berbanding terbalik dengan kecepatan angin dan stabilitas cuaca. Dari kondisi meteorologi ke dua tapak, kecepatan angin rata-rata di daerah Semenanjung Muria lebih besar dibandingkan dengan Pesisir Banten.



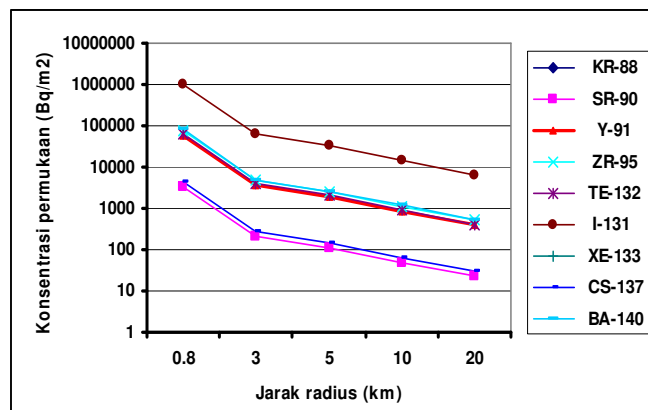
Gambar 6. Konsentrasi udara untuk tapak Semenanjung Muria



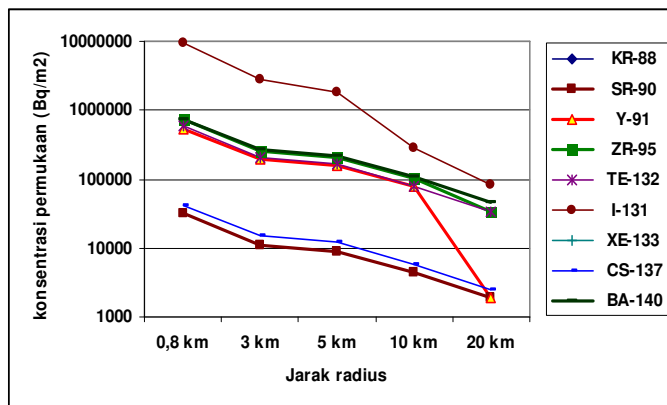
Gambar 7. Konsentrasi udara untuk tapak Pesisir Banten

Hasil perhitungan dan simulasi untuk konsentrasi deposisi di permukaan tanah diberikan pada Gambar 8 (Semenanjung Muria) dan Gambar 9 (Pesisir Banten). Untuk dua tapak, konsentrasi hasil belah yang terdeposisi di permukaan tanah maksimum ditunjukkan oleh I-131. Konsentrasi deposisi bergantung pada konsentrasi nuklida yang terdispersi di udara, sehingga besarnya konsentrasi deposisi sesuai dengan besarnya konsentrasi di udara. Khusus untuk gas mulia tidak terdeposisi di permukaan, karena sifat gas mulia tidak berinteraksi dengan materi.

Penerapan model simulasi untuk dispersi atmosferik sangat dipengaruhi oleh postulasi kecelakaan yang menghasilkan *source term* yang lepas dari PLTN, dan kondisi meteorologi tapak khususnya arah angin, kecepatan, dan stabilitas cuaca.



Gambar 8. Konsentrasi deposisi permukaan tapak Semenanjung Muria



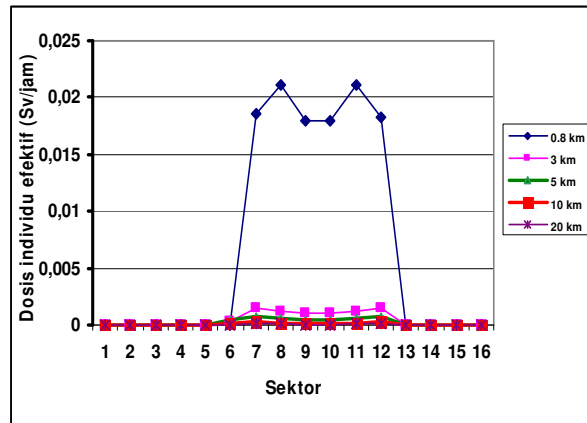
Gambar 9. Konsentrasi deposisi permukaan untuk tapak Pesisir Banten

Model konsekuensi

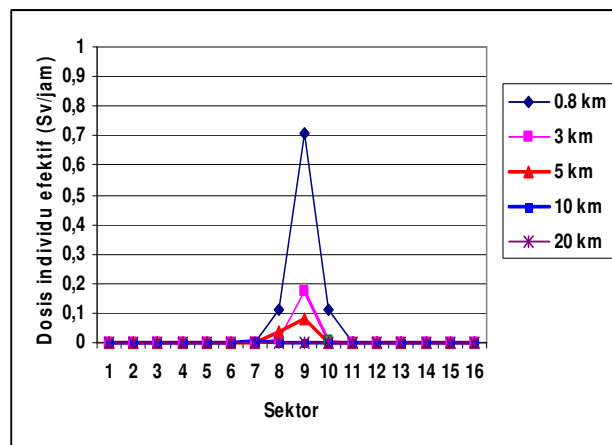
Berdasarkan model konsekuensi yang digunakan dalam simulasi seperti Gambar 2, perhitungan konsekuensi mengikuti *pathway*: perhitungan dosis eksternal dari paparan langsung awan radioaktif dan paparan permukaan tanah. Sedangkan perhitungan dosis internal yaitu inhalasi, imersi, dan ingesti. Hasil perhitungan dosis individu berdasarkan *pathway* dan nuklida diberikan pada Gambar 10 sampai Gambar 17. Sedangkan dosis kolektif pada Gambar 18 dan Gambar 19.

Dosis Individu

Dosis individu yang ditampilkan adalah termasuk *short term dose*. Dosis individu efektif untuk (*individual effective dose*) 16 sektor dan jarak radius sampai 20 km ditampilkan di Gambar 10 (Semenanjung Muria) dan Gambar 11 (Pesisir Banten). Dari Gambar 10, penerimaan dosis individu efektif (untuk semua *pathway* dan organ) tertinggi untuk masyarakat Semenanjung Muria yang berdomisili dalam radius 0,8 km dari PLTN untuk sektor 9 dan 12. Sedangkan untuk tapak Pesisir Banten (Gambar 11), dosis tertinggi untuk sektor 9. Penerimaan dosis individu efektif dipengaruhi oleh *source term*, kondisi meteorologi dan *pathway*. Dari kondisi ke dua tapak pada Gambar 4 dan Gambar 5, kondisi meteorologi untuk Semenanjung Muria adalah arah angin yang dominan menuju sektor 8 dan sektor 11, dan *pathway* yang lebih beragam untuk sektor sektor tersebut, terutama untuk *pathway* interna. Hal yang sama berlaku untuk tapak Pesisir Banten. Untuk beberapa sektor untuk ke dua tapak nilai dosis tidak ada seperti sektor 1 sampai sektor 3, dan sektor 13 sampai sektor 16 untuk tapak Semenanjung Muria, serta sektor 4 sampai sektor 6 untuk tapak Pesisir Banten, disebabkan daerah tersebut bukan merupakan daratan, sehingga model yang diajukan dalam tulisan ini tidak berlaku.

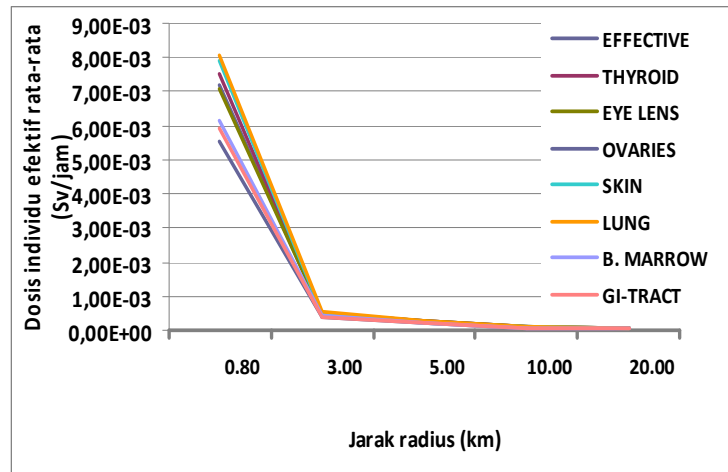


Gambar 10. Dosis individu efektif untuk (*individual effective dose*) tapak Semenanjung Muria

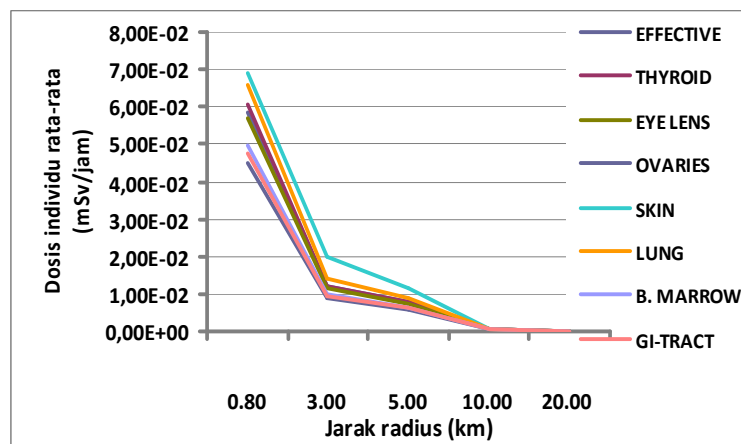


Gambar 11. Dosis individu efektif (*individual effective dose*) tapak Pesisir Banten

Dosis individu rata-rata (*Mean individual dose*) berdasarkan organ dan jarak radius terdapat pada Gambar 12 dan Gambar 13. Dosis individu rata-rata tertinggi tapak Semenanjung Muria adalah untuk organ paru-paru (radiasi interna dari awan radioaktif) dan untuk radius 800 m yang merupakan daerah eksklusi. Untuk tapak Pesisir Banten dosis tertinggi untuk kulit dan *lung* dan untuk jarak radius yang sama yaitu 800 m.



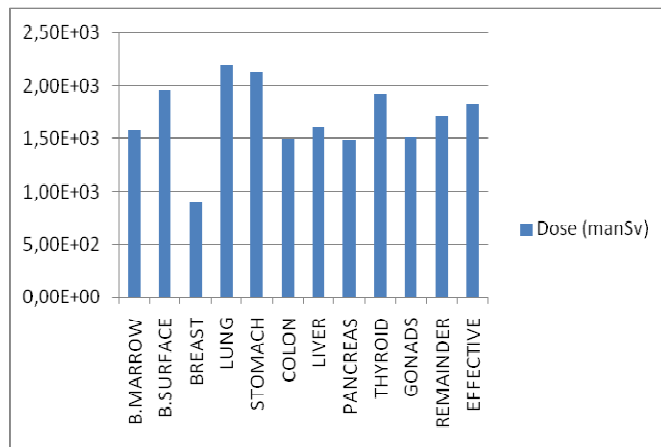
Gambar 12. Dosis individu rata-rata (*Mean individual dose*) tapak Semenanjung Muria



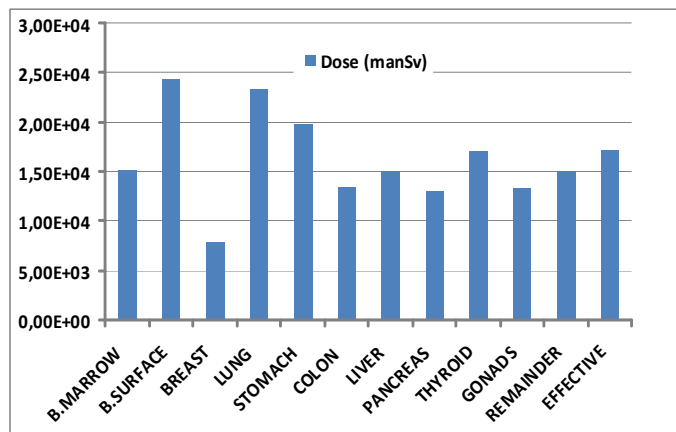
Gambar 13. Dosis individu rata-rata (*Mean individual dose*) tapak Pesisir Banten

Dosis kolektif berdasarkan *pathway*

Dosis kolektif dipengaruhi oleh besarnya penerimaan dosis individu dan tingkat kepadatan dari populasi yang bermisili di daerah tersebut. Dosis kolektif untuk ke dua tapak diberikan pada Gambar 14 untuk tapak Semenanjung Muria dan Gambar 15 untuk tapak Pesisir Banten. Secara keseluruhan dosis kolektif untuk tiap organ tapak Pesisir Banten lebih besar dibandingkan tapak Semenanjung Muria. Selain karena penerimaan dosis individu untuk tapak Pesisir Banten lebih besar, juga karena tingkat kepadatan populasi juga lebih tinggi.



Gambar 14. Dosis kolektif tapak Semenanjung Muria



Gambar 15. Dosis kolektif tapak Pesisir Banten

Model tindakan protektif

Pemodelan tindakan protektif mengikuti model yang ditampilkan pada Gambar 3, yaitu untuk mitigasi konsekuensi dari kecelakaan potensial PLTN yang dipostulasikan. Tindakan protektif yang dilakukan digolongkan berdasarkan waktu tindakan yaitu tindakan awal atau segera (*Early protective action*) dan tindakan tunda (*Late protective action*). Termasuk tindakan awal adalah: sheltering, evakuasi, pemberian tablet jodium, dan kontaminasi personil, dan termasuk tindakan tunda adalah pembatasan makanan (*food banning*), relokasi, dan kontaminasi area.

Tindakan protektif segera (*Early protective action*)

Tindakan *Sheltering*

Sheltering adalah tindakan atau kegiatan yang berlindung di dalam bangunan dengan kondisi ventilasi yang minimum, untuk menghindari paparan eksternal yaitu paparan dari awan radioaktif dan permukaan (*cloudshine* dan *groundshine*) dan paparan internal yaitu dari inhalasi dan imersi dari awan radioaktif. Tindakan *sheltering* diambil berdasarkan penerimaan dosis masyarakat sekitar tapak, yaitu penerimaan dosis seluruh tubuh atau dosis yang diterima organ tubuh paru-paru atau thyroid. Kriteria penerimaan berbeda sesuai dengan rekomendasi yang diberikan, ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kriteria tindakan protektif awal berdasarkan penerimaan dosis

Tindakan	Whole body (mSv)			Lung atau Tyroid (mSv)		
	A [11]	B [12]	C [13]	A [11]	B [12]	C [13]
Sheltering	5-50	10	5	50-500	-	50
Evakuasi	50-500	50	50	50-500	-	500
Pemberian Tablet KJ	-	-	20	500-5000	-	200

Berdasarkan kriteria dari Tabel 1, tindakan protektif awal yang dilakukan untuk masyarakat di tapak Semenanjung Muria dan Pesisir Banten diberikan pada Tabel 2. Tindakan *sheltering* yang dianjurkan berdasarkan perhitungan penerimaan dosis dari Tabel 2 dan kriteria dari Tabel 1, untuk tapak Semenanjung Muria diberlakukan untuk masyarakat yang berdomisili dalam radius di bawah 1 km (kriteria A, B, dan C penerimaan dosis seluruh tubuh); serta untuk tapak Pesisir Banten diberlakukan untuk masyarakat di bawah 1 km (kriteria A, B, dan C penerimaan dosis seluruh tubuh dan atau organ tubuh thyroid atau paru-paru), serta yang berdomisili sampai 3 km (kriteria A, B, dan C penerimaan dosis seluruh tubuh).

Tabel 2. Hasil perhitungan penerimaan dosis rata-rata berdasarkan radius dan organ tubuh

Radius km	Dosis (mSv/jam) Semenanjung Muria			Dosis (mSv/jam) Pesisir Banten		
	Seluruh tubuh	Thyroid	Lung (paru-paru)	Seluruh tubuh	Thyroid	Lung (paru-paru)
0,8	7.19E+00	7.50E+00	8.05E+00	5.84E+01	6.05E+01	6.58E+01
3,0	4.76E-01	5.02E-01	5.28E-01	1.21E+01	1.20E+01	1.42E+01
5,0	2.64E-01	2.81E-01	2.91E-01	7.60E+00	7.60E+00	8.82E+00
10,0	8.98E-02	9.43E-02	1.00E-01	4.07E-01	4.16E-01	4.72E-01
20,0	4.33E-02	4.58E-02	4.81E-02	1.78E-01	1.89E-01	2.01E-01

Jika berdasarkan penerimaan dosis per sektor (Gambar 10 sampai Gambar 13), tindakan *sheltering* di tapak Semenanjung Muria diberlakukan untuk sektor 7 sampai sektor 12 dalam radius 1 km. Sedangkan untuk tapak Pesisir Banten, masyarakat yang berdomisili dalam radius 3 km untuk sektor 8 dan sektor 9, dan masyarakat yang berdomisili dalam radius 1 km ditambah untuk sektor 10 sampai sektor 12.

Tindakan evakuasi

Evakuasi adalah tindakan protektif segera yaitu mengungsikan masyarakat dari daerah yang diperkirakan terkontaminasi ke tempat yang aman dari kontaminasi radioaktif yang lepas ke lingkungan akibat terjadinya kecelakaan. Berdasarkan kriteria pada Tabel 1 dan penerimaan dosis pada Tabel 2, maka tindakan evakuasi untuk masyarakat yang berdomisili di tapak Semenanjung Muria tidak diberlakukan. Sedangkan untuk tapak Pesisir Banten, evakuasi dilakukan untuk masyarakat yang berdomisili dalam radius 1 km, terutama untuk sektor 8 dan sektor 9 (kriteria A, B, dan C penerimaan dosis seluruh tubuh dan atau organ tubuh thyroid atau paru-paru).

Pemberian tablet jodium

Pemberian tablet jodium adalah untuk mencegah penyerapan nuklida radioaktif terutama I-131 yang merupakan produk hasil belah bahan bakar nuklir. Fungsi kerja tablet jodium adalah menjenuhkan kelenjar tyroid, sehingga diharapkan akan mencegah penyerapan I-131. Berdasarkan data Tabel 1 dan Tabel 2, tindakan pemberian tablet jodium untuk masyarakat di tapak Semenanjung Muria tidak diberlakukan, karena penerimaan dosis masih di bawah kriteria. Sedangkan untuk masyarakat di tapak Pesisir Banten, pemberian tablet jodium untuk yang berdomisili dalam radius 1 km, terutama untuk sektor 8 dan sektor 9. Pemberian tablet jodium diharapkan kurang dari 2 hari setelah kecelakaan yang melepaskan produk hasil belah ke lingkungan [13].

Tindakan protektif tunda (*Late protective action*)
Pembatasan makanan (*Food banning*)

Pembatasan makanan (*food banning*) diberlakukan untuk produk yang diproduksi lokal di daerah tapak yang diperkirakan terkontaminasi lepasn produk hasil belah akibat kecelakaan PLTN. Pembatasan makanan dilakukan sesuai dengan *pathway* rantai makanan dengan mengikuti model pada Gambar 2. Jenis makanan yang digunakan sebagai masukan dalam simulasi perhitungan penelitian adalah: susu, produk biji-an (*grain product*), kentang, sayuran hijau, sayuran umbi (*root vegetable*), sayuran non hijau, daging sapi, dan daging babi. Kriteria pembatasan makanan berdasarkan penerimaan dosis dan konsumsi maksimum dicantumkan pada Tabel 3, menurut ketentuan penerimaan dosis yang digunakan dalam simulasi perhitungan. Waktu pembatasan dari 1 minggu sampai 20 tahun. [14].

Tabel 3. Kriteria pembatasan makanan berdasarkan penerimaan dosis dan konsumsi maksimum

No.	Jenis makanan	Konsumsi	Penerimaan Dosis (Sv/tahun)	
			Seluruh tubuh	Thyroid
1.	Susu	210 liter/tahun	0,005	0,05
2.	Daging sapi	70 kg/tahun	0,005	-
3.	Daging babi	70 kg/tahun	0,005	-
4.	Produk biji-bijian	170 kg/tahun	0,005	-
5.	Kentang	200 kg/tahun	0,005	-
6.	Sayuran hijau	80 kg/tahun	0,005	-
7.	Sayuran non hijau	100 kg/tahun	0,005	-
8.	<i>Root vegetable</i>	50 kg/tahun	0,005	-

Dari hasil perhitungan simulasi menggunakan model pada Gambar 2 dan Gambar 3, dan kriteria *food banning* yang digunakan pada perhitungan dari Tabel 3, diperoleh hasil untuk tapak Semenanjung Muria pada Tabel 4.

Tabel 4. *Food banning* untuk tapak Semenanjung Muria

No.	Jenis makanan	Jarak radius (km)				
		0,8	3	5	10	20
1.	Susu	Sektor 7 s/d 12	Sektor 6 s/d 13	Sektor 6 s/d 13	Sektor 9 s/d 10	Sektor 9 s/d 10
2.	Daging sapi	Sektor 7 s/d 12	Sektor 6 s/d 13	Sektor 6 s/d 13	Tidak ada	Tidak ada
3.	Daging babi	Sektor 7 s/d 12	Sektor 6 s/d 13	Sektor 6 s/d 13	Tidak ada	Tidak ada
4.	Produk biji-bijian	Sektor 7 s/d 12	Sektor 6 s/d 13	Sektor 6 s/d 13	Tidak ada	Tidak ada
5.	Kentang	Sektor 7 s/d 12	Sektor 6 s/d 13	Sektor 6 s/d 13	Tidak ada	Tidak ada
6.	Sayuran hijau	Sektor 7 s/d 12	Sektor 6 s/d 13	Sektor 6 s/d 13	Tidak ada	Tidak ada
7.	Sayuran non hijau	Sektor 7 s/d 12	Sektor 6 s/d 13	Sektor 6 s/d 13	Tidak ada	Tidak ada
8.	<i>Root vegetable</i>	Sektor 7 s/d 12	Sektor 6 s/d 13	Sektor 6 s/d 13	Tidak ada	Tidak ada

Food banning pada Tabel 4, dilakukan dalam jangka waktu 1 minggu, setelah 1 minggu tidak ada pembatasan konsumsi makanan produksi lokal dari area tersebut. Pembatasan makanan yang akan dilakukan pada area tapak Semenanjung Muria, jika terjadi lepasn karena adanya kecelakaan yang dipostulasikan pada perhitungan ini, untuk susu berlaku sampai radius 20 km khusus untuk sektor 9 dan 10. Sedangkan untuk produk makanan lainnya, pembatasan dilakukan hanya sampai radius 5 km.

Pembatasan makanan untuk model dan postulasi kecelakaan yang sama, tetapi untuk tapak Pesisir Banten, ditampilkan pada Tabel 5. Dengan hasil simulasi yang hampir sama dengan Tabel 4, *Food banning* pada Tabel 5, dilakukan dalam jangka waktu 1 minggu, untuk susu berlaku sampai radius 20 km khusus untuk sektor 8, 9 dan 10. Sedangkan untuk produk makanan lainnya, pembatasan dilakukan hanya sampai radius 5 km. Perbedaannya hanya daerah sektor yang diberlakukan pembatasan, yang berkaitan dengan kondisi spesifik masing-masing tapak, kondisi lingkungan dan kondisi meteorologi.

Tabel 5. *Food banning* untuk tapak Pesisir Banten

No.	Jenis makanan	Jarak radius (km)				
		0,8	3	5	10	20
1.	Susu	Sektor 1 s/d 16	Sektor 1, dan sektor 7 s/d 16	Sektor 1, dan sektor 7 s/d 16	Sektor 8 s/d 10	Sektor 8 s/d 10
2.	Daging sapi	Sektor 1 s/d 16	Sektor 1, dan sektor 7 s/d 16	Sektor 1, dan sektor 7 s/d 16	Tidak ada	Tidak ada
3.	Daging babi	Sektor 1 s/d 16	Sektor 1, dan sektor 7 s/d 16	Sektor 1, dan sektor 7 s/d 16	Tidak ada	Tidak ada
4.	Produk biji-bijian	Sektor 1 s/d 16	Sektor 1, dan sektor 7 s/d 16	Sektor 1, dan sektor 7 s/d 16	Tidak ada	Tidak ada
5.	Kentang	Sektor 1 s/d 16	Sektor 1, dan sektor 7 s/d 16	Sektor 1, dan sektor 7 s/d 16	Tidak ada	Tidak ada
6.	Sayuran hijau	Sektor 1 s/d 16	Sektor 1, dan sektor 7 s/d 16	Sektor 1, dan sektor 7 s/d 16	Tidak ada	Tidak ada
7.	Sayuran non hijau	Sektor 1 s/d 16	Sektor 1, dan sektor 7 s/d 16	Sektor 1, dan sektor 7 s/d 16	Tidak ada	Tidak ada
8.	<i>Root vegetable</i>	Sektor 1 s/d 16	Sektor 1, dan sektor 7 s/d 16	Sektor 1, dan sektor 7 s/d 16	Tidak ada	Tidak ada

Tindakan relokasi

Tindakan relokasi umumnya berkaitan dengan tindakan evakuasi. Jika daerah yang terkontaminasi masih berlangsung dalam waktu tertentu, dan tidak dilakukan dekontaminasi area, maka tindakan evakuasi berlanjut ke tindakan relokasi.

KESIMPULAN

Penerapan model terhadap lepasan radioaktif dan tindakan protektif untuk kecelakaan potensial PLTN dilakukan berdasarkan postulasi kecelakaan potensial terjadi pada contoh tapak di Indonesia. Analisis terhadap model menghasilkan bahwa model lepasan dan tindakan protektif dipengaruhi oleh kondisi meteorologi tapak yang meliputi kecepatan angin, arah angin, dan stabilitas cuaca; dan kondisi lingkungan tapak yang meliputi kerapatan dan distribusi penduduk, produksi pertanian dan peternakan penduduk lokal, dan konsumsi hasil pertanian dan peternakan setempat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. IAEA.: Generic Models for use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to The Environment, Safety series No.19, STI/PUB/1103, Vienna (2001).
- [2]. Soffer, et al.: Accident Source term for Light Water Nuclear Power Plant, Final Report. NUREG-1465, US-NUREC, Washington (1995).
- [3]. IAEA.: Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant, Safety Series No. 50-SG-3, IAEA, Vienna (1980).
- [4]. European Commission.: Determination of the In-Containment Source term for a Large-Break Loss of Coolant Accident, EUR 19841 EN (2001).
- [5]. Stephenson W., Dutton, L.M.C., Handy, B.J., and C. Smedley.: Realistic Methods for Calculating the Release and Consequences of Large LOCA, EUR 14179EN, Commission of the European Communities (1992).
- [6]. BMG.: Data Meteorologi Kabupaten Serang 2008-2009, Serang (2010).
- [7]. BPS.: Potensi Desa (PODES) Propinsi Banten 2008-2009, Biro Pusat Statistik (2010).
- [8]. BMG.: Data Meteorologi Muria 2006-2007, (2007).
- [9]. BPS.: Potensi Desa (PODES) Kabupaten Jepara 2006-2007, Biro Pusat Statistik (2007)
- [10]. Crawford, J., Domel, R.U.: *RadCon: a Radiological Consequences Model*, User Guide, ANSTO M-128, ISBN 0-642-59983, Sydney, 2-10, (2000).
- [11]. Jones, J., A. Bixler N., Burns, S., and Schelling ,G F.J., Review of NUREG-0654, Supplement 3.: Criteria for Protective Action Recommendations for Severe Accidents, NUREG/CR-6953, Vol. 1, SAND2007-5448P, (2007).
- [12]. ARIZONA Department of Health Service.: Radiological Emergency Response Plan, Division of Public Health Services Bureau of Emergency Preparedness and Response September, pp.3, 2007.
- [13]. IAEA.: Techniques and Decision Making in The Assessment of Off Site Consequences of an Accident in a Nuclear Facility, Safety series no. 86, Vienna (1987).
- [14]. PC COSYMA, EUROPEAN COMMISSION, PC COSYMA, version 2.0.: User Guide, National Radiological Protection Board, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, (1995).